



# REMARQUES EPISTEMOLOGIQUES SUR L'OBJET COMMUN DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES ET DE LA COSMOLOGIE

Michel Paty

## ► To cite this version:

Michel Paty. REMARQUES EPISTEMOLOGIQUES SUR L'OBJET COMMUN DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES ET DE LA COSMOLOGIE. Audouze, Jean ; Musset, Paul et Paty, Michel. Les particules et l'univers, Presses Universitaires de France, p. 47-75, 1990. halshs-00183776

**HAL Id: halshs-00183776**

**<https://shs.hal.science/halshs-00183776>**

Submitted on 12 Nov 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# REMARQUES EPISTEMOLOGIQUES SUR L'OBJET COMMUN DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES ET DE LA COSMOLOGIE

**Michel Paty**

Equipe REHSEIS\*, CNRS, Paris \*\*

*Résumé* . Si l'on admet que les principes et l'objet d'une science ou d'une théorie scientifique sont dans un rapport de définition réciproque, la physique des particules élémentaires et la cosmologie proposent une situation intéressante du point de vue de leur statut épistémologique. En effet, ces deux disciplines, fort différentes quant à leur origine et quant à leur objet tel qu'on peut le concevoir a priori, se trouvent depuis quelque temps converger vers un objet commun qui polarise une part importante des recherches théoriques actuelles. On se propose d'examiner la situation phénoménique et les problèmes conceptuels et théoriques qui ont abouti, pour ces deux sciences, à la caractérisation d'un objet "fondamental" en partie commun aux deux, ainsi que d'analyser les problèmes épistémologiques posés par leurs principes respectifs qui se resserrent autour de cet objet commun.

L'exposé est organisé comme suit :

1. Introduction
2. Objets et principes dans les sciences physico-mathématiques
3. La cosmologie, de la définition de son objet à la recherche de ses principes
4. La physique des particules à la poursuite de son objet et à l'unification de ses principes
5. Quels principes pour un objet commun ?

-----  
\* Recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques.

\*\* Adresse postale : Equipe REHSEIS, Université Paris VII, Tour 46, 2e étage, 2 place Jussieu, F-75251 Paris-cedex 05, France.

## I. Introduction.

La rencontre - jusqu'au recouvrement partiel - de la physique des particules et de la cosmologie constitue une réalité de la physique d'aujourd'hui qui s'est imposée récemment et ne va pas sans étonner quelque peu. Que l'on songe à l'importance, dans chacune de ces disciplines, de l'expérience ou de l'observation, à la nature si différente des instruments qui y sont affectés, aux pratiques si diverses dans l'une et dans l'autre, aux objets théoriques si opposés qu'elles supposent : la cosmologie, voici vingt ans, était encore tenue pour une science de nature spéculative, et la physique des particules était, jusque voici une quinzaine d'années, développée selon des conceptions essentiellement "empiristes". Or, la réalité de cette rencontre et de ce recouvrement, le physicien Léon Lederman pouvait l'exprimer voici quelque temps en ces termes suggestifs : "les physiciens des particules pointent leurs microscopes vers le bas et les astrophysiciens leurs télescopes vers le haut, et les uns et les autres s'aperçoivent qu'ils sont en train de regarder des objets qui sont presque les mêmes..." (1). Il est vrai qu'il ne mentionne que les astrophysiciens, mais les cosmologues en sont une espèce particulière, et ce qui les occupe recouvre plus encore que les objets de l'astrophysique ce qui occupe actuellement les physiciens des particules.

Ce que nous voudrions proposer dans les lignes qui suivent, c'est une approche qui nous aide à comprendre rationnellement - ou, du moins, qui pose quelques jalons pour une telle compréhension - cette "découverte" conjointe des astrophysiciens et des cosmologues d'une part, et des physiciens des particules d'autre part, à savoir qu'ils s'occupent d'un même objet et que, pour le dire d'une manière résumée, frappante mais non pas inexacte, dans la pénétration la plus fine du monde matériel, il semble que ce soit l'univers dans sa totalité qui apparaisse - il est vrai, au stade initial de son développement, mais gros des événements ultérieurs.

On n'a pas fini de s'interroger sur ce recouvrement des objets de sciences si différentes, sur cette convergence d'approches de disciplines que tout ou presque jusque là paraissait opposer. Ils sont certes marqués par des circonstances particulières et contingentes, et l'on pourrait tenter de dénombrer les facteurs qui ont influé sur les pratiques de la recherche et contribué à la détermination de la direction prise. Peut-être cependant est-il plus intéressant de poser le problème d'un point de vue épistémologique qui considère les objets et la nature de chacune de ces sciences d'un point de vue fondamental. Celui de la relation réciproque entre les principes et l'objet d'une théorie scientifique - physique, en l'occurrence - semble ici particulièrement approprié. On a pu constater, à l'occasion d'autres considérations de nature épistémologique et historique (à propos de la mécanique quantique, comme à propos de la théorie de la relativité) (2), que ce point de vue pouvait apporter des lueurs sur la nature des propositions d'une science ou sur certaines conditions (entendues aussi bien comme conditions effectives que comme conditions de possibilité) de son établissement. Ce point de vue apparaît particulièrement approprié à l'examen comparatif et relationnel des deux disciplines considérées. Nous examinerons donc, en premier lieu, la catégorisation épistémologique du rapport de la théorie à son objet; puis nous l'appliquerons aux deux sciences et à leur point de rencontre.

## 2. Objets et principes dans les sciences physico-mathématiques.

Par objet d'une théorie, nous entendons ce qu'elle décrit par ses propositions essentielles, ce qu'elle vise en tant qu'elle le cerne par sa description, en somme quelque chose qui est en position de relation logique avec la théorie, sous la forme théorie  $\longleftrightarrow$  objet.

La relation se lit dans les deux sens : celui de la théorie qui décrit un objet, celui de l'objet qui renvoie à la théorie.

Cette relation logique appelle la notion de théorie complète relativement à son objet, ou de complétude au sens restreint, telle qu'elle est décrite par Einstein dans l'argument sur la complétude de la mécanique quantique (argument EPR) (3), par opposition à la complétude au sens élargi, invoquée également par Einstein à propos de la direction de ses propres recherches en théorie du champ relativiste généralisé, et à laquelle font implicitement appel les théories actuelles des champs quantiques de jauge unifiés.

Lorsqu'un certain resserrement du rapport entre la théorie et son objet est acquis (c'est-à-dire lorsque la théorie peut prétendre à une certaine complétude au sens restreint), la théorie atteint à un état que l'on peut appeler quasi-stable. Par théorie quasi-stable, on entendra une théorie qui définit un espace dans lequel elle fonctionne (ou s'applique) d'une manière bien établie, "normale", si l'on veut, pour traiter des systèmes particuliers qui obéissent à la définition générale de son objet tel qu'on vient de la considérer. Des exemples familiers de telles théories quasi-stables se proposent immédiatement à l'esprit : la mécanique classique, la thermodynamique, la relativité restreinte, la relativité générale, la mécanique quantique, la théorie quantique des champs... Ces théories se présentent, pour chacune d'entre elles, comme un ensemble structuré de "principes fondateurs", de concepts définissant les grandeurs physiques et d'un formalisme. C'est à partir du moment où une théorie se trouve en possession d'une telle structure, déterminée avant tout par ses principes fondateurs, qu'elle acquiert l'état quasi-stable qui lui permet de dessiner un espace propre, par exemple de caractériser une description scientifique, ou le cadre théorique d'une telle discipline.

C'est ainsi que, une fois munie de ses trois principes newtoniens, la mécanique classique a eu pour objet la description des mouvements, des interactions et de l'évolution des systèmes de points matériels reliés entre eux par un potentiel d'interaction. Ou que la thermodynamique, définie par l'acquisition de ses deux principes, se voit dès lors désigner comme objet les propriétés énergétiques des corps et des systèmes matériels. Quant à la relativité restreinte, son objet peut être défini comme étant les propriétés d'invariance des lois physiques sous des transformations spatio-temporelles et la covariance des grandeurs représentant les systèmes définis dans l'espace-temps. L'histoire de son développement - de son apparition comme théorie de la relativité - indique bien comment se resserre le rapport théorie/objet, si l'on compare la relativité restreinte au sens d'Einstein et les théories précédentes ou contemporaines. Ces dernières avaient pour objet soit l'éther mécanique, milieu de la propagation des perturbations électromagnétiques (de Maxwell à Hertz), soit l'éther électromagnétique propageant le champ unifié représentant les propriétés physiques des corps (avec Lorentz, Wien, Max Abraham, Poincaré, Langevin) : avec Einstein (dès son travail de 1905), l'objet théorique s'avère plus général et en même temps plus restreint que l'objet de la théorie électromagnétique, il accède à un statut propre exactement circonscrit, et la théorie de la relativité restreinte fournit un cadre conceptuel et un formalisme pour les transformations spatio-temporelles des systèmes physiques (repères d'inertie). Avec la théorie de la relativité générale, l'on a en même temps un cadre et une théorie dynamique (de la gravitation); avec la mécanique quantique, un cadre;

avec la théorie quantique des champs, à la fois un cadre et une théorie (l'électrodynamique quantique, puis ses extensions récentes).

La notion de cadre théorique - conceptuel et formel - apparaît importante relativement à la caractérisation de l'objet au sens logique : l'objet, pour les théories-cadres, est en quelque sorte l'expression des caractères et des implications du schéma conceptuel et formel dans les dérivations qui en résultent quant aux propriétés des objets particuliers étudiés. Cette idée peut être perçue intuitivement si l'on évoque par exemple l'objet relativiste (et ses propriétés de covariance) ou l'objet quantique (caractérisation probabiliste, non-séparabilité, etc.)

Nous nous proposons maintenant d'utiliser la catégorisation épistémologique du rapport de la théorie à son objet ainsi décrite, en l'appliquant à l'étude des deux systèmes théorico-observationnels ou théorico-expérimentaux que sont la cosmologie et la physique des particules, espérant par là contribuer quelque peu à éclairer rationnellement leurs statuts respectifs aussi bien que celui du recouvrement de leurs objets, et de l'éventuelle mais problématique convergence de leurs principes. C'est d'une manière spécifique à chacun de ces systèmes que les données d'observation ou d'expérience se sont vues intégrées à un cadre conceptuel et formel, définissant ainsi, par construction, un objet et une théorie propres. Dans leur cas, le problème de la complétude au sens restreint (c'est-à-dire de la simple complétude logique) glisse pour ainsi dire vers celui de la complétude au sens élargi dans la mesure où ces deux champs théoriques laissent ouverte, dès la définition même de leurs objets, la voie vers un mouvement d'unification et d'achèvement. Il semble possible d'exprimer ce double mouvement de la manière suivante : la cosmologie, définissant a priori son objet, se voit entraîner vers la recherche de ses principes; la physique des particules, pour sa part, se définit autour d'un objet sans cesse poursuivi, et se voit ainsi amenée à l'unification de ses principes. La logique du rapport de la théorie à son objet dans chacun des cas entraîne la rencontre et, par voie de conséquence, des emprunts mutuels, par une sorte d'économie de l'échange (épistémologique) qui aboutit à la caractérisation d'un objet théorique et d'une théorie dotée de caractères inédits. C'est ce cheminement que nous décrivons dans la suite de ce chapitre.

### 3. La cosmologie, de la définition de son objet à la recherche de ses principes.

#### *3.1 L'objet de la cosmologie. Son établissement.*

Bien que la notion d'univers soit très ancienne, formée dès les premières représentations du monde extérieur, mythiques puis rationnelles, ce n'est que très récemment qu'elle a accédé au rang de concept scientifique, et que la cosmologie a acquis le statut de science. Avant le XXe siècle, une approche scientifique de l'univers dans son ensemble était impossible selon les canons épistémologiques et au regard des présupposés philosophiques en vigueur concernant la notion même de science (3).

L'univers est devenu objet d'une approche scientifique, définissant une discipline, à la faveur d'une conjonction observationnelle et théorique. Du point de vue de l'observation, le fait déterminant a été la découverte de la nature des nébuleuses extragalactiques ou galaxies (les "univers-îles"), rendue possible par une plus exacte appréciation des distances, et de leur mouvement de récession, marqué par le décalage vers le rouge, en moyenne, de leur spectre : commencées avec les mesures de Slipher sur le mouvement d'Andromède, en 1912, ces observations culminent avec celles de Hubble, et la découverte par celui-ci de la loi qui porte son nom, selon laquelle la vitesse de récession est proportionnelle à la distance ( $v=Hl$ ) (4). Du

point de vue théorique, c'est en 1917 qu'Einstein puis de Sitter ont l'idée d'appliquer à l'univers considéré dans sa globalité la théorie récente de la relativité générale (5). Einstein introduit la constante cosmologique qui, pour maintenir l'univers statique, permet de contrebalancer l'attraction gravitationnelle; la solution de de Sitter est différente : l'univers est stationnaire car vide de matière et le terme cosmologique est responsable d'une récession des corps d'épreuve. Ce faisant, la cosmologie théorique est pourvue d'un principe fondateur (outre le principe de relativité généralisée) : le principe cosmologique, énoncé par Einstein et baptisé ainsi plus tard par Milne, qui pose l'isotropie et l'homogénéité de la matière dans l'univers (6). Un peu plus tard suivent les premiers modèles cosmologiques d'univers en évolution, avec A. Friedman (1922) et Georges Lemaître (1927) (7).

C'est à la jonction de ces deux approches, observationnelle et théorique, que la cosmologie s'établit comme science. Les circonstances en sont complexes, comme c'est la règle. En particulier, la loi linéaire de Hubble, de nature purement expérimentale, avait été anticipée théoriquement par Weyl, en 1923, à partir du modèle de de Sitter, puis, indépendamment, par Robertson, en 1928, et il est possible que cela ait influé à quelque degré sur Hubble bien que celui-ci ait toujours proclamé sa défiance des idées théoriques. Mais on peut retenir comme une circonstance décisive le fait que Lemaître se soit rendu compte des implications de son modèle du point de vue observationnel : la loi de Hubble et la constante  $H$  peuvent s'en déduire. De fait, le modèle de Lemaître implique l'homogénéité et l'isotropie dont Milne montra, en 1935, que la forme de la loi de Hubble en résulte (8).

Dès lors la voie était ouverte à la considération d'autres propriétés de l'univers qui n'ont pas cessé depuis d'être au premier rang des préoccupations de la cosmologie : la densité de l'univers (sa valeur par rapport à la densité critique d'un univers minkowskien, telle que la prédit le modèle d'Einstein-de Sitter de 1932 (10), qui conduit à la recherche systématique des objets cosmiques, à faire un "catalogue de l'univers" pour établir lequel des scénarios possibles (recontraction ou expansion indéfinie) est celui de l'univers réel (11); l'âge de l'univers, tel que l'indique la constante de Hubble (sa détermination requiert un modèle cosmologique) (12), et tel qu'on peut le déterminer à partir d'autres données cosmologiques (abondance relative des isotopes, évolution stellaire); enfin le degré d'homogénéité de l'univers.

En même temps d'autres modèles cosmologiques voient le jour, dont celui de l'univers stationnaire (*steady state cosmology*) avec création continue de matière, dû à Bondi, Gold et Hoyle. Puis, en 1965, le modèle de Lemaître, repris par Gamow, accède au rang de modèle standard à la faveur de la découverte de la radiation centimétrique fossile isotrope du fond du ciel, résidu refroidi du "big-bang", et de la détermination de l'abondance de l'hélium, qu'appuieront ultérieurement d'autres tests.

### 3.2 Dès lors se déterminent les grandes directions de la recherche en cosmologie

Ce sont tout d'abord les directions venues désormais "classiques", telles qu'on les voit exposés dans les ouvrages de référence, comme, par exemple, *Physical Cosmology* de P.J.E. Peebles (13). L'organisation de cet ouvrage comporte, outre les éléments de cosmologie classique et des considérations sur les modèles cosmologiques basés sur la relativité générale, les items suivants : base observationnelle de l'hypothèse de l'homogénéité et de l'isotropie de l'univers, en moyenne sur une grande échelle; échelle de l'univers d'après les déterminations empiriques de la constante de Hubble et d'après les autres indications de l'âge de l'univers; détermination

de la densité moyenne de masse, par l'établissement du catalogue des principaux objets contenus dans l'univers et problème de la masse manquante; bruit de fond du ciel, ou radiation micro-onde fossile, témoin de la boule de feu primordiale, et son isotropie; abondance de l'hélium primordial.

Avec les deux derniers sujets nous nous trouvons déjà dans les circonstances de la rencontre de la cosmologie et de la physique des particules atomiques, bien qu'il ne s'agisse encore que du stade des réactions nucléaires. L'abondance de l'hélium, qui représente 25% de la matière visible de l'univers, constitue un test de l'univers primordial (pour l'essentiel, l'hélium a été produit aux premiers instants du big-bang). Quant à l'isotropie de la radiation de 2°7 Kelvin, en l'absence de relation de causalité dans l'univers déjà relativement étendu au moment de son émission, elle pose un problème relié aux scénarios possibles des premiers instants, pour la solution duquel on a émis récemment l'hypothèse de "modèles inflationnaires" (à expansion plus rapide, pour des raisons qui relèvent de la théorie des particules). A ces grands problèmes déjà presque traditionnels, s'ajoute celui de l'abondance relative de la matière et de l'antimatière, dont les observations astrophysiques récentes permettent de conclure à la dissymétrie, l'univers étant constitué pour l'essentiel de matière (l'antimatière n'est présente que pour une partie sur un milliard). Enfin, le problème de la masse manquante est pour une part un problème de physique des particules (hypothétiques monopoles magnétiques ou particules encore inconnues, éventuelle masse non nulle des neutrinos).

### *3.3. L'objet simplifié de la cosmologie.*

Bien que les problèmes posés par la cosmologie soient d'une grande complexité, et que les moyens d'y répondre fassent appel à des observations difficiles, à des interprétations délicates, et qu'ils requièrent la mobilisation de nombreuses disciplines, on peut considérer que l'objet de cette science est un objet simple, ou simplifié, par la définition de l'approche même. "En cosmologie", écrit P.J.E. Peebles (14), "le recours à la simplicité physique, à la pensée pure et à la connaissance révélée est poussé très loin, parce que nous n'avons presque rien d'autre pour avancer." "C'est ainsi", poursuit-il, "que l'on est parvenu à quelques images simples de ce que l'univers pourrait être"; et il s'agit de savoir si ces images, qui nous permettent de nous familiariser avec l'univers, sont une approximation raisonnable, et, si oui, de savoir comment améliorer cette approximation.

De fait, la plupart des chapitres relatifs aux directions "classiques" de la cosmologie portent sur des problèmes qui s'expriment en termes de paramètres simples. On peut les comprendre en laissant de côté les détails des modèles cosmologiques et se contenter bien souvent d'arguments de symétrie. La cosmologie fait pour une grande part appel à des objets simplifiés et à des ordres de grandeurs : objets simples comme le sont par exemple ces trous noirs, pourtant si loin de l'intuition et de la pensée classique, dont J.A. Wheeler nous rappelle que leurs propriétés macroscopiques classiques sont déterminées par les seuls paramètres de leur masse, leur charge et leur moment angulaire (15). Mais la théorie détaillée, qui peut être omise en première analyse, est nécessaire si l'on entre dans certains détails, si, par exemple, l'on s'interroge sur la signification physique de certains tests (comme la relation décalage vers le rouge/magnitude).

Ce qui, en l'état actuel des choses, définit l'objet de la cosmologie, ce sont essentiellement les principes suivants :

-Tout d'abord l'unité de la matière et la permanence de ses lois même dans des conditions extrêmes. Remarquons que par cette hypothèse fondatrice, qui a constitué un préalable aux travaux en cosmologie et dont les atténuations proposées, comme par exemple la variation dans le temps de certaines constantes fondamentales, se sont avérées infondées, la cosmologie se réserve la possibilité de s'incorporer, suivant ses besoins et selon les conditions aux limites qu'elle impose (16), l'une ou l'autre des théories physiques. Cet apport va s'avérer déterminant pour ce qui est de la période très primitive de l'univers.

- Ensuite, le principe de relativité généralisée, qui énonce l'invariance des lois de la physique dans les transformations spatio-temporelles quelconques.

- Enfin, le principe cosmologique.

Ces principes, dont le statut n'est pas homogène, n'épuisent pas l'objet de la cosmologie. Bien des propriétés de celui-ci échappent à ces seules considérations, et d'autres hypothèses ou propositions ont été invoquées par les cosmologues. L'une des premières fut le principe de Mach, selon lequel la masse inertielle des corps résulte de leur interaction avec les autres masses de l'univers (ce "principe" ne va pas sans poser de nombreux problèmes; bien qu'il ait aidé à l'élaboration de la relativité générale, il lui est contradictoire, car il recourt implicitement à l'action instantanée à distance). Plus récemment, on a proposé, sous le nom de "principe anthropique" de considérer que la présence dans l'univers de l'homme en tant qu'observateur imposait des contraintes sur les grandeurs cosmologiques et même sur des grandeurs physique fondamentales. Pour certains cosmologues, un tel principe permettrait de rendre compte de certaines coïncidences à première vue étranges entre des grands nombres, que l'on peut former à partir des constantes sans dimension de la physique, et des grandeurs cosmologiques, et posséderait ainsi une valeur heuristique (17). Contentons-nous ici de remarquer que l'invocation de principes de ce genre témoigne pour l'insuffisance actuelle des principes formels de la cosmologie, qui ne cernent pas leur objet d'une manière aussi "serrée" que le font les autres disciplines établies des sciences physiques. Que ceci soit un effet d'immaturation de cette science, ou un caractère inhérent à sa nature particulière, nous n'en déciderons pas ici, car il ne s'agit pas de proposer une norme que devrait impérativement suivre toute science, ou théorie scientifique, mais de diagnostiquer des caractères spécifiques à la science qui nous occupe, telle qu'elle se présente en son état actuel.

Ce que nous pouvons remarquer, et cela se rapporte autant au caractère de simplicité idéale des objets abordés qu'à l'incomplétude des principes de la cosmologie, c'est que, pour pallier l'insuffisance des déterminations - et notamment celle par les principes - cette science fait appel à de nombreuses extrapolations qu'elle justifie de manière spécifique dans chaque cas. Enumérons-en quelques unes : passage d'un univers local à l'univers visible puis à l'univers global; passage de la masse visible à la masse observable, puis à la masse globale (la justification dans ce cas est peut-être la plus sûre, car elle s'appuie sur des effets physiques déterminés, par exemple, par le théorème du viriel (18)); extrapolations sur les distances; ou encore appel au traitement théorique d'objets nouveaux, ou simplement hypothétiques (quasars, trous noirs, monopoles magnétiques, ou ces "objets dont on n'a pas idée" auxquels il n'est pas rare que se réfèrent les cosmologues). Extrapolations, encore, sur la manière dont il faut traiter des conditions proches de l'état primordial de l'univers, c'est-à-dire de ses états très chauds et très denses, qui correspondent, par ces conditions, aux états de la matière de très haute énergie : c'est cet objet extrapolé, précisément, qui correspond à la physique des particules élémentaires.



Du point de vue physique, théorique, les cosmologues sont astreints à analyser dans chaque cas la nature des extrapolations en jeu, afin de parvenir à des approximations meilleures et à s'affranchir autant qu'ils le puissent de l'arbitraire. Et, en fin de compte, cet objet, désigné, mais d'assez loin, par des principes fondamentaux qui ne suffisent pas à l'insérer dans une détermination précise, se voit extrapolé, c'est-à-dire défini idéalement selon des hypothèses simplificatrices supplémentaires, de telle façon qu'il accède à une définition plus précise et contraignante que sa définition a priori (laquelle n'était en somme que : l'univers et son évolution). Ce type de procédure exprime que la cosmologie est une science en demande de principe : ce sont ces principes que la physique des particules va lui fournir selon des modalités propres.

### *3.4. Problèmes propres à une science ayant pour objet l'univers.*

La cosmologie pose, par son établissement et sa définition même, à la philosophie de la connaissance des problèmes qui se distinguent de ceux habituellement considérés pour les sciences de la nature. Ce n'est pas notre propos d'en présenter ici l'analyse, mais on ne doit pas ignorer qu'ils constituent le fond de la trame où s'inscrit la situation épistémologique que nous avons sommairement caractérisée et qu'ils la marquent indéniablement. L'un de ces problèmes est relatif à l'observation et peut s'énoncer ainsi : l'observateur, qui généralement extériorise son objet, se trouve situé à l'intérieur de l'univers. Comment peut-il envisager un univers qui lui soit extérieur ? N'y a-t-il pas là une aporie de la définition de la cosmologie comme science ? En fait, le problème énoncé ainsi est relié à celui général de l'observation, abondamment posé à propos des sciences contemporaines, par exemple la mécanique quantique. Indiquons, sans trancher le débat, que, pour toute science, la distinction du sujet et de l'objet, de l'observateur qui décrit et du système observé, est affaire de convention et qu'il est toujours possible, par une approximation adéquate, de séparer par la pensée l'observateur et l'observé. Ceux qui n'acceptent pas cette séparation au niveau des principes (comme l'école de Copenhague en mécanique quantique) l'admettent de fait lorsqu'ils décrivent des systèmes. Dans le cas de l'univers, une telle approximation est possible en pratique : mais ceci ne préjuge pas d'une interrogation philosophique plus fondamentale dont la généralité dépasse à vrai dire le cas particulier de la cosmologie - ou de la mécanique quantique. Dans toute science, nous le savons désormais, l'objet est construit par une approche conceptuelle et théorique. C'est la nature de cette construction - et, en dernière analyse, celle des concepts et principes - qui est en question, et non le fait qu'il s'agisse d'une construction. Rien n'interdit, à ce stade, de sérier les approximations, en admettant que la cosmologie n'est pas une science de la totalité - qui impliquerait le sujet dans toutes ses dimensions -, mais qu'elle s'applique à des conditions physiques pensables en faisant abstraction d'un point aveugle, qui, comme pour tout autre type de connaissance, détermine la direction d'un éclairage.

D'autres aspects spécifiques de la cosmologie sont la non-reproductibilité de l'objet, due à son caractère global et à sa nature temporelle (ou "historique"), et le fait que ses propositions sont rétrodictives davantage que prédictives. Ces caractères sont à première vue inédits pour une science physique, mais ne le sont pas dans d'autres domaines - la biologie, les sciences historiques. A coup sûr ils déterminent une nouveauté en physique et rapprochent cette science, dans la mesure où elle s'adjoint la cosmologie, d'autres qui avaient longtemps semblé plus "imparfaites". Mais peut-être faudrait-il s'interroger sur la nature exacte de cette "non-reproductibilité", et sur le statut de la rétrodiction comparée à la prédiction. On peut également

s'interroger sur la nature de la différence entre l'expérience et l'observation (astronomie, astrophysique et cosmologie étant ramenées généralement à cette dernière) ... Est-on bien sûr que ces différences soient si marquées ?

Que de telles questions, méthodologiques, épistémologiques et philosophiques, se voient posées, et qu'elles invitent probablement à des réponses nuancées, cela constitue en tout cas un aspect important de l'accès de la cosmologie au rang de science. Elles peuvent inciter, non pas de manière spéculative mais à l'occasion d'une mise en pratique - et des plus "massives" -, à reconsidérer sur ces points ce qui semblait tenu pour des évidences.

Retenons, pour notre propos, que la cosmologie, en l'état où nous l'avons considérée, à partir de la définition posée de son objet - objet programmatique, mais en même temps définitif, et donc désigné par une proposition logique qui le lie à une science déterminée - se trouve être une science à la recherche de ses principes.

#### 4. La physique des particules, à la poursuite de son objet et à l'unification de ses principes.

4.1. La physique des particules élémentaires, comme rejeton de la physique atomique puis de la physique nucléaire, nous invite, par sa situation propre, par son statut actuel en physique, mais également par l'histoire de sa formation et de son développement, à distinguer à son propos deux "objets", ou plutôt deux aspects de son objet : l'objet "logique", et l'objet "phénoménologique". Le premier est celui de la mécanique quantique, dans sa version relativiste, et plus précisément de la théorie quantique des champs, théorie définie par des principes et un formalisme établi, et constituant un cadre conceptuel et formel précis, auquel renvoie l'objet considéré sous l'angle de la relation logique.

Le second - l'objet "phénoménologique" - concerne les propriétés dynamiques des systèmes de particules, ainsi que les conditions de leur investigation. Dans la suite de la physique nucléaire, telle qu'elle s'est développée dans le courant des années 1930, il correspondait à des aspects surtout empiriques, traités dans le moule théorique du premier, qui constitue l'objet "logique". Entre le cadre et les données s'interposent des modèles théoriques particuliers. Dans la phase de l'investigation simplement "empirique", ces modèles n'entretiennent pas de revendications particulières à l'égard de principes qui permettraient de réduire les données des phénomènes, à part, bien entendu, les principes qui gouvernent la mécanique quantique relativiste, et qui, par là, imposent leurs conditions à la description des particules élémentaires et de leurs propriétés. Mais cette même phase voit déjà des interpénétrations disciplinaires qui à quelque degré préparent la convergence qui nous occupe : la physique des particules bénéficie d'apports de la géophysique (rayons cosmiques), de l'astrophysique (rayonnement des étoiles et des objets cosmiques, réactions nucléaires et évolution stellaire...).

De la distance entre les deux aspects ainsi caractérisés de l'objet de la physique des particules, et de la soumission du second aux définitions et aux conditions de traitement du premier, résulte un effet de mouvement par lequel l'objet logique (celui de la complétude au sens restreint) et l'objet phénoménologique tendent l'un vers l'autre. Le problème de la complétude glisse alors insensiblement du premier sens au second, plus général : celui d'une théorie dont l'objet englobe totalement les propriétés de la matière, c'est-à-dire une théorie unifiée.

4.2. On pourrait montrer, en suivant les divers moments d'élaboration de la physique des particules, du point de vue théorique et expérimental, qu'une détermination rationnelle de cet

ordre est bien inhérente aux problèmes abordés et aux méthodes employées, aussi contingentes les circonstances effectives fussent-elles. La voie vers l'unification s'est trouvée préparée aussi bien par des considérations "phénoménologiques" (relatives aux propriétés voisines d'objets particuliers qu'il s'agissait de rapprocher pour les interpréter, les expliquer), que par des considérations formelles (telles que le traitement par les groupes de transformation des quantités qui caractérisent les particules, de Weyl à Wigner...), l'une préparant la voie à l'autre, ou plutôt l'une avançant en s'épaulant sur l'autre. C'est ainsi que la détermination des propriétés des particules élémentaires rendra possible leur classification, ou que l'étude des propriétés des interactions conduira à la forme des champs et de l'hamiltonien.

A l'étape suivante, la justification de l'unification des champs d'interaction s'effectue en invoquant un principe formel : en l'occurrence, un principe d'invariance capable de recouvrir plusieurs théories ou modèles théoriques jusqu'alors considérés séparément, tant du point de vue de la structure (forme de l'hamiltonien, traitement par les champs quantifiés) que de celui des paramètres en jeu (constante de couplage ou intensité de l'interaction, portée.).

Cette justification se marque tout d'abord sous les espèces de la légitimité du traitement : par exemple, l'interaction faible peut être considérée dans le formalisme de la théorie quantique des champs, dès lors qu'elle respecte l'invariance de jauge, c'est-à-dire que la considération d'une masse nulle pour les bosons intermédiaires  $W^+$  et  $Z$  est une étape autorisée (19); ou encore, il est possible de placer dans le même schéma théorique un champ qui se conserve par parité (20), comme le champ électromagnétique, et un champ qui ne se conserve pas, comme le champ faible, moyennant un appariement approprié des grandeurs physiques qui représentent les particules en interaction. De la sorte, ce qui était auparavant considéré comme des difficultés ou même des impossibilités de principe se voit tout simplement aboli : pendant longtemps, la masse nécessairement non nulle des bosons intermédiaires ou la non-conservation de la parité avaient paru proscrire par principe le traitement rigoureux de l'interaction faible par la théorie quantique des champs et son unification avec l'interaction électromagnétique. La chromodynamique quantique, théorie du champ des interactions fortes, s'est avérée possible dès lors qu'ont été connues les propriétés des quarks, à la faveur encore d'un double cheminement théorique, formalisé d'une part (classification des particules hadroniques suivant la symétrie unitaire  $SU(3)$  et étude des représentations de ce groupe, élargi par la suite), phénoménologique d'autre part (diffusion de grande inélasticité des leptons sur les hadrons et propriétés des algèbres de courants). L'identificateur propre aux quarks sous leurs propriétés d'interaction forte - la couleur - et leur "liberté asymptotique" (qui assure la petitesse de leur constante d'interaction aux courtes distances) rendent possible l'approche perturbative de la théorie des champs (21).

La justification de l'unification prend ensuite la forme de la confirmation par les tests expérimentaux et de la cohérence des résultats obtenus dans les divers domaines d'application de la théorie.

4.3. L'unification, partielle (relative à des domaines encore distincts, électrofaible d'une part, fort d'autre part), s'effectue donc sous le signe de la recherche de symétries relatives aux grandeurs physiques considérées pour les particules et leurs interactions. Le caractère approché des symétries, marqué par leur brisure aux énergies basses, alors qu'elles sont de plus en plus exactes aux hautes énergies, entraîne l'élaboration théorique dans un mouvement asymptotique par la logique même des objets considérés et de l'approche choisie. Le domaine des interactions

différenciées étant par définition celui de la brisure de symétrie, le problème posé est dès lors de savoir comment caractériser la région de symétrie exacte qui est celle de la forme idéale du champ, laquelle détermine ses propriétés fondamentales; et, l'ayant caractérisée du point de vue théorique, de savoir comment y parvenir.

De là, la situation présente, où, après avoir été cantonnée dans le domaine des énergies traditionnelles, c'est-à-dire accessibles à l'expérience (mais à vrai dire tout en suivant déjà une montée permanente en énergie), la physique des particules se propose la considération fondamentale d'énergies très hautes dans une région extrapolée, qui se trouve correspondre aux conditions (d'énergies, de masses, de densités, de températures, de distances et de temps) de l'univers primordial de la cosmologie.

Telle est, ainsi dessinée, la voie royale de la physique des particules vers la cosmologie : c'est la voie des principes (ceux des symétries fondamentales) et celle de la limite (asymptotique), de l'extrapolation. Avant cette voie, il existait une convergence, mais plus prosaïque : celle qui envisageait les objets particuliers du cosmos comme lieux ou sources de particules (supernovae, rayons cosmiques, accélération cosmique des particules...). Elle relevait certes plutôt de l'astrophysique que de la cosmologie, mais ces objets de l'astrophysique posaient le problème du cosmos lui-même dès lors qu'on s'interrogeait sur leur nature, leur origine, leurs liens entre eux, et sur certaines analogies quant à leurs évolutions et à leur traitement théorique possible (par exemple, le rapport qu'il est possible de faire entre un trou noir et l'univers).

4.4. La montée vers des symétries plus générales, plus englobantes, est motivée par le projet d'unification; mais celui-ci est mû par une dynamique interne, celle qui vise au dépassement des insuffisances à l'égard de la complétude au sens général. C'est ainsi que le modèle standard de la théorie électrofaible et de la chromodynamique quantique, valide à basse énergie, laisse arbitraires de nombreux éléments de la théorie. Ce modèle s'écrit en théorie des groupes :  $SU(2) \times U(1) \times SU(3)_C$ , les deux premiers groupes d'invariance étant relatifs à la théorie électrofaible et le troisième au groupe de couleur de la chromodynamique quantique.

Les quarks et les leptons, particules élémentaires sans structure (jusqu'à l'approximation de  $10^{-16}\text{cm}$ ), sont rassemblés dans les multiplets de  $SU(2)$  suivants :

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 |u_i| \quad |v_e| \\
 | \quad | \quad , \quad | \quad | \quad , e_R^- , u_{iR} , d_{iR} \\
 |d_i|_L \quad |e^-|_L
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 |t_i| \quad |v_\mu| \\
 | \quad | \quad , \quad | \quad | \quad , \tau_R , t_{iR} , b_{iR} \\
 | \quad | \quad , \quad | \quad | \\
 |b_i|_L \quad | \tau |_L
 \end{array} \\
 \\
 \begin{array}{l}
 |c_i| \quad |v_\mu| \\
 | \quad | \quad , | \quad | \quad , \mu_R , c_{iR} , s_{iR} \\
 |s_i|_L \quad | \mu |_L
 \end{array}
 \end{array}$$

u, d, c, s, t, b, représentant les quarks et e,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu$ , les leptons; L et R sont les indices qui figurent le caractère gauche ou droit de la polarisation, et i est l'indice de couleur (i=1,2,3) du groupe  $SU(3)_c$ .

Le modèle standard maintient des constantes de couplage distinctes pour chaque champ : la théorie électrofaible fait intervenir deux paramètres ( $G_F$ , constante de Fermi, ou l'une des masses  $M_W$  ou  $M_Z$ , et l'angle de Weinberg-Salam,  $\theta_{W-S}$ ), et n'est pas encore à cet égard une véritable unification (les deux constantes ne se réduisent à une seule qu'à la faveur d'une symétrie supérieure comme par exemple  $SU(5)$ ). Le mécanisme de Higgs qui rompt la symétrie (et engendre les différences de masse entre les bosons W, Z et  $\gamma$ ) fait intervenir des bosons de spin nul (scalaires), dont la masse est laissée indéterminée.

De même, la chromodynamique quantique laisse libre de nombreux paramètres, dont la valeur ne peut être fournie que par l'expérience (nombres et masses des gluons - bosons d'échange de cette interaction - et des quarks, paramètres de mélange des quarks...). Le modèle standard n'explique pas l'origine des "générations" de quarks (leur répartition en multiplets comme ci-dessus), ni les masses des quarks et des leptons, ni la valeur absolue des charges électriques des particules (22), ni la conservation du nombre baryonique (lié à l'asymétrie des baryons et antibaryons dans l'univers); la théorie requiert au total 27 paramètres libres dont on peut espérer qu'une symétrie supérieure les détermine.

Tel est en partie le programme des théories de grande unification (GUT), qui, après les premiers travaux de J.C. Pati et A. Salam en 1973 et de S. Glashow en 1974, proposant d'unifier les interactions par des théories de jauge, ont pris une grande importance à partir de 1978. Cette importance, précisément, est due pour une part à la démonstration expérimentale de la validité élargie des modèles électrofaible et chromodynamique, et à la détermination précise du paramètre  $\theta_{W-S}$ , dont la valeur mesurée correspond précisément à la valeur prédite par les théories d'unification (23); et, pour une autre part, à ce que ces théories rendent compte de l'asymétrie baryons-antibaryons de l'univers, tant pour ce qui est de son existence que de sa valeur (le mécanisme est une violation spontanée de l'invariance CP à très haute énergie) (24), et fournissent une prédiction adéquate de la masse du quark b; de plus, ces théories possèdent un pouvoir prédictif sur les transitions de haute température dans l'univers primordial (25).

Les théories de grande unification, qui imposent la considération d'énergies asymptotiques et une échelle des énergies, des distances et des temps correspondant à celle de l'univers dans les conditions de ses premiers instants, se sont imposées comme objet de recherche à la fois par leurs implications en physique des particules et par leurs conséquences en cosmologie : cette conjonction constitue un fait nouveau en physique. Elles sont relatives à ces deux domaines ou ces deux sciences, et présentent corrélativement des traits différents de ceux des théories habituellement considérées en physique des particules.

Résumons en une phrase cette évocation: la physique des particules élémentaires, dans son projet d'élaboration d'une dynamique des interactions fondamentales, entraînée à la poursuite de son objet, s'est placée sur la voie d'une unification de ses principes.

## 5. Quels principes pour un objet commun ?

5.1. La rencontre de la physique des particules et de la cosmologie a pris depuis quelques années un tour particulier en ceci que ce sont les objets mêmes de ces sciences, pris dans leur généralité, qui sont venus en coïncidence. Le recouvrement n'est pas total, la cosmologie se préoccupant également de problèmes qui échappent à la physique des particules et inversement. Les théories de grande unification ou la recherche de la quantification de la relativité générale ne sont pas exactement superposables à la théorie cosmologique : mais elles en constituent une partie intégrante dans la mesure où les conditions physiques auxquelles elles se rapportent correspondent précisément à celles d'un certain stade de l'univers : les toutes premières fractions de seconde, pour ces théories (la "grande unification" concerne la période antérieure à  $10^{-36}$  seconde environ). Mais la cosmologie de l'univers primordial s'étend au-delà : jusqu'aux "trois premières minutes", qui voient le déroulement de tout le scénario initial, lequel détermine la structure fondamentale ultérieure de l'univers, incluant la dissymétrie matière-antimatière, la production d'hélium, l'émission de la radiation isotrope et très probablement les inhomogénéités de la répartition de matière-énergie qui vont "ensemencer" les galaxies. Cette période décisive n'est pas que relative à la physique des particules extrapolée à sa partie la plus spéculative; elle porte sur les diverses interactions déjà différenciées à ce stade, par les brisures successives de symétrie dues au refroidissement, à la dilution de l'énergie par l'expansion, et fait appel à la physique nucléaire et à la physique atomique. Elle manifeste à cet égard, en les dotant d'une dimension "historique" par la succession temporelle, la solidarité de ces diverses disciplines et leur continuité, et rend tangibles, sous la forme d'un processus d'évolution, l'interaction des structures propres aux différents niveaux d'organisation de la matière.

Par ailleurs, la cosmologie ne s'arrête pas à la considération de cette période, et s'attache toujours, comme par le passé, à la structuration et à l'évolution ultérieure de l'univers.

Quant à la physique des particules, elle continue de se définir dans un champ plus vaste que celui de la recherche de symétries exactes, et ne s'identifie pas à la seule "grande unification", même si celle-ci en représente peut-être actuellement l'aspect le plus fascinant.

Le recouvrement des deux disciplines est donc partiel, mais il n'en est pas moins fondamental. Du point de vue des grandeurs physiques, ce qui marque la convergence et les conditions relatives à l'objet commun des deux sciences, c'est l'échelle des correspondances entre les conditions physiques de la matière élémentaire et celle de l'univers aux premiers instants de son déploiement : température, densité, énergie, distance, relatives aux propriétés de la matière et du rayonnement, dans le domaine de la physique quantique. Il y correspond une échelle des temps qui représente les âges de l'univers dans ces conditions, et qui dépend des modèles théoriques choisis, modèles d'univers d'une part, modèle de la matière dans ces conditions de densité et de température qui renvoient aux théories des champs fondamentaux d'autre part. Cette échelle de correspondance a évidemment un sens en raison de l'unicité de l'objet de la physique, de l'identité postulée (depuis au moins Copernic et Galilée, sans remonter aux savants ioniens), de la matière de l'univers et de celle des particules.

5.2. Bien que cette considération sur l'unicité de l'objet physique et l'identité de la matière terrestre et cosmique paraisse aujourd'hui triviale, son application ne fut pas toujours évidente, comme en témoignent certains interdits du positivisme d'Auguste Comte sur la considération de la structure intime des objets célestes. C'est précisément quand cette unicité et cette identité se sont avérées effectives, avec le développement de l'astrophysique, que la

cosmologie comme science a été rendue possible. Elle portait dès lors en elle-même les conditions de possibilité de sa rencontre avec la physique de la matière élémentaire.

A cet égard, une étape marquante et décisive a été l'analyse spectrale des corps célestes par Fraunhoffer, qui rendait possible les mesures d'abondance des éléments dans le soleil et les étoiles; la connaissance du caractère nucléaire des réactions solaires, qui permettait de résoudre le problème de la synthèse des éléments et celui de la durée de vie du soleil, a également marqué une autre étape importante. Spectroscopie atomique et physique nucléaire sont ainsi associées étroitement à l'étude de l'univers dans ses objets et dans son ensemble.

Il apparaît en fait que l'avènement de la cosmologie comme science, ainsi que l'énoncé même de ses conditions de possibilité, sont liés à sa rencontre avec les développements de la physique qui lui sont contemporains à chaque étape de son parcours.

Après l'idée d'univers, introduite au XVIII<sup>e</sup> siècle par Herschel qui fit les premiers sondages de ce nouvel objet à l'aide de télescopes, il est significatif que les premières applications de considérations physiques à l'univers considéré en général aient été celles relatives à l'entropie, par Lord Kelvin dès 1852, puis par Helmholtz et Clausius, et celles relatives à la théorie cinétique des gaz, de Lord Kelvin à Poincaré: comme si la rationalité propre à cet objet global et à ces théories nouvelles appelait leur rapprochement mutuel. Indiquons à cet égard deux autres idées, apparues avant celles qui sont désormais devenues classiques : l'introduction, dès 1902, par H. Deslandres, de l'électromagnétisme dans ce qui allait devenir la cosmologie (il proposa un modèle électromagnétique des galaxies spirales), et la première suggestion d'une genèse des éléments, qui serait liée à l'évolution stellaire, par Sir N. Lockyer, dès 1890 (26).

De manière plus précise, c'est avec le modèle cosmologique de la "boule de feu" primordiale (modèle de Lemaître repris par Gamow) que s'effectue véritablement le premier pas vers la rencontre de la cosmologie et de la physique des particules élémentaires. Il est significatif ici encore que la considération du comportement du rayonnement dans un univers en expansion (proposés pour la première fois par R.C. Tolman en 1934, reprise en 1948 par G. Gamow et R.A. Alpher qui l'appliquèrent à leur théorie de la production des éléments dans l'univers primordial), en même temps qu'elle ouvrait la voie à cette rencontre, préparait la condition décisive pour qu'une théorie "standard" de la cosmologie s'impose. Gamow et Alpher proposèrent en effet la réaction-clé de synthèse des éléments ( $n+p \rightarrow d + \gamma$ ) et calculèrent la température du rayonnement émis à cette époque originelle et celle qu'il devrait avoir actuellement (27). C'est en 1965, comme on sait, que A. Penzias et R.W. Wilson observèrent la radiation électromagnétique micro-onde isotrope du fond du ciel et, mesurant son spectre, établirent qu'elle avait bien la distribution de corps noir et qu'elle était isotrope (28).

Par toutes ces considérations on peut dire, en quelque sorte, que l'objet de la cosmologie physique était prédéterminé pour sa rencontre avec celui de la physique de la matière élémentaire.

A cela il faudrait ajouter que certaines postulations implicites des fondateurs des théories cosmologiques portaient en elles l'exigence même de cette rencontre. Bien que les recherches d'Einstein sur le champ unitaire ne soient pas directement reliées à ses travaux en cosmologie, elles le sont en fait à travers la théorie de la gravitation : or, de l'aveu d'Einstein lui-même, une de leurs motivations était l'espoir de résoudre indirectement le problème des quanta, c'est-à-dire de parvenir à une théorie des particules de la matière atomique et nucléaire. D'un autre côté, Lemaître faisait état, dès 1931, de l'idée d'un seul quantum à l'origine de l'univers : "si nous

remontons le cours du temps", écrivait-il, "nous devons trouver toujours moins de quanta" (car leur nombre augmente dans l'univers en raison du deuxième principe de la thermodynamique), "jusqu'à ce que nous trouvions toute l'énergie de l'univers concentrée en un petit nombre, ou même, en un seul quantum" (29). L'atome primitif de Georges Lemaître est formulé sur le modèle d'une particule qui se désintègre par radioactivité, et cette importation en cosmologie des récentes données de la physique de la matière élémentaire était déjà grosse des considérations ultérieures.

5.3. Il est possible de trouver d'autres circonstances préparatoires de la rencontre, dans des considérations purement théoriques des pères de la cosmologie moderne. Je n'en évoquerai ici que deux, parmi d'autres dont il faudrait faire un inventaire, qui portent chacune une signification relativement à la définition de l'univers comme un objet de description scientifique, et à la complétude (au sens général de la description). La première est d'Eddington, la seconde d'Einstein.

En soulevant le problème du rapport entre les grandeurs relatives à l'univers et celles relatives aux particules élémentaires, et en remarquant les coïncidences des grands nombres que l'on peut obtenir à partir des constantes sans dimension considérées dans les deux cas, Eddington avait en tête l'idée que les quantités physiques de la physique microscopique ne sont pas déterminées en elles-mêmes, mais par l'intermédiaire d'un étalon de grandeur qui, pour éliminer tout arbitraire (tel que par exemple, la définition des étalons standard), doit être une unité fondamentale dans la nature, et ne peut être, pour un corps donné, que l'ensemble des autres corps de l'univers, c'est-à-dire l'univers dans son ensemble (30). L'unité fondamentale de grandeur dans la nature ne peut être que le rayon de l'électron ou celui de l'univers, et ils se définissent l'un l'autre. L'apparente coïncidence numérique des grands nombres de nature si différente résulte alors fondamentalement de la logique de la structuration du cosmos lui-même et de notre possibilité de l'appréhender (31). Eddington a une expression particulièrement frappante et de portée profonde pour exprimer cette conviction : "Nature is thereby measured in her own gauge", *la nature se mesure à sa propre jauge* (32). Ce qui est une belle expression de l'exigence de complétude, au sens de clôture, de la théorie de l'univers comme des particules élémentaires dont ce dernier est constitué.

Quant à Einstein, il évoque cette complétude ou clôture proposée en principe, mais de réalisation lointaine, en ces termes : "Je voudrais exprimer ici un principe qui ne peut reposer pour l'instant que sur une foi profonde dans la simplicité, c'est-à-dire dans l'intelligibilité de la nature : il n'existe pas de constantes *arbitraires*. Je veux dire que la nature est ainsi faite qu'il est possible de poser logiquement des lois si précisément définies que, à l'intérieur de ces lois, seules des constantes totalement déterminées de façon rationnelle interviennent (et non des constantes dont on pourrait changer la valeur numérique sans pour autant bouleverser la théorie)." (33) Un tel principe concerne aussi bien la théorie des particules et des systèmes matériels que celle de l'univers : il exprime d'ailleurs que la théorie complète des systèmes matériels (théorie unifiée) ne peut qu'être aussi une théorie de l'univers.

Il est intéressant de constater que c'est un principe très semblable que nous retrouvons, fondamentalement, dans les considérations actuelles de la cosmologie et de la physique des particules, même si celles-ci sont encore bien loin de formaliser un déterminisme complet des constantes fondamentales. Il semble en tout cas en tout cas qu'elles l'acceptent comme perspective, dont la réalisation partielle fixe le progrès respectif des théories proposées.



5.4. Pour conclure ces remarques - qui n'ont rien d'exhaustif - il nous semble déceler entre les deux disciplines ou théories convergeant autour d'un objet partiel qui leur est commun, ce qu'on pourrait appeler une économie de l'échange (l'entendant épistémologiquement).

Pour la physique des particules, la cosmologie serait le domaine de la *justification* de ses principes de symétrie les plus généraux, puisqu'elle offre le seul domaine permis à l'observation (indirecte). Mais, en même temps, la cosmologie infuse à la théorie des particules (celle de ce domaine extrapolé) certains de ses propres caractères et de ses "faiblesses", qui résultent notamment de son statut par rapport à l'observation.

C'est ainsi que le physicien S. Weinberg évoquait voici quelque temps le caractère quelque peu gratuit des hypothèses cosmologiques sur l'univers primordial. Ces travaux, indiquait-il, "n'entraînent malheureusement aucune prédiction quantitative précise parce que, longtemps après les diverses étapes initiales proposées, l'univers a traversé une longue période d'équilibre statistique qui a effacé tous les vestiges phénoménologiques intéressants des époques antérieures. Après la "longue cuisson" de l'univers, il ne nous reste actuellement qu'un "ragoût" cosmique final qui ne nous fournit aucune indication sur ce qu'ont pu être les ingrédients primitifs." (34) Par cette métaphore culinaire, c'est une réelle modestie des physiciens qui s'exprime, détonant avec l'ambition de leur projet, sur le genre de certitude auquel il est possible de parvenir. Les théories se savent très spéculatives. Disons-nous que les physiciens les cultivent, plus que pour leur rapport possible au réel, par goût du jeu ? Il y a sans doute des deux.

Autre trait de cet échange, quant aux acquisitions de la physique des particules : la cosmologie, par l'échelle des temps cosmiques, lui octroie la dimension de l'histoire : c'est l'histoire ici des symétries et de leurs brisures, l'irréversibilité de la succession des transitions de phase. Elle provoque une modification épistémologique, par rapport aux canons des théories physiques réversibles, dont on n'a peut-être pas encore pris la mesure.

Le type de prédictivité de la théorie subit une modification sensible, par rapport à ce à quoi la physique nous avait habitués, en ceci qu'une classe importante des prédictions n'est pas susceptible d'être testée, sinon d'une manière très indirecte, et c'est alors la cohérence de la chaîne des conséquences qui constitue le critère principal de validité. Les tests ne sont effectifs que par des observations sur les derniers chaînons de conséquences (il existe cependant quelques tests directs et reproductibles, dans des circonstances limitées; ils appartiennent encore au domaine de la physique des particules, et non de la cosmologie). Les conséquences de la théorie ne dépassent l'énoncé des possibles qu'en étant portées sur l'échelle temporelle où elle se réalisent (ou se sont - éventuellement - réalisées).

En sens inverse, la physique des particules fournit à la cosmologie des principes fondamentaux plus restrictifs, qui comblent son manque à cet égard; ces principes la transforment, en se joignant à la relativité générale, qui était constitutive de la cosmologie dès le départ, en une théorie physique qui se tourne vers les exigences de complétude (au deuxième sens, général) et d'unité. En particulier, l'un des aspects les plus sensibles de la convergence des deux disciplines est la nécessité d'inclure la gravitation dans le processus de symétrie-unification. Cette généralisation appartenait déjà à l'approche de la physique des particules elle-même, parce qu'elle y représentait l'étape de l'unification qui suit directement celle des trois champs d'interaction relatifs aux particules.

En s'incorporant les théories de jauge unifiées, la cosmologie entre - à un certain stade de ses conditions, celles de l'univers primordial - dans le cadre ou le moule quantique. La signification d'une quantification de la gravitation, d'une unification de la mécanique quantique et de la relativité générale, prend alors toute sa force. Elle est exigée par une simple considération temporelle: celle des instants de l'univers qui précèdent la valeur du temps de Planck ( $t < 10^{-43}$  seconde). C'est, du point de vue théorique, l'un des enjeux les plus grands de la cosmologie se constituant comme théorie fondamentale : cette perspective est peut-être ce qui légitime le mieux une telle ambition - de faire de la cosmologie une *théorie* fondamentale, contournant par là-même les difficultés épistémologiques considérées a priori (place de l'observateur, etc.). En résumé, cette économie de l'échange aboutit à ceci que, poursuivant un objet, par le mouvement d'unification de ses principes, qui s'enfuit dans les régions asymptotiques, la physique des particules rencontre l'objet même que la cosmologie s'était défini a priori comme étant le sien à partir de l'observation cosmique et de la théorie de la relativité générale. Par là-même, elle fournit à la cosmologie une partie au moins des principes qui lui manquaient, et les deux disciplines convergent vers un nouveau type de théorie - les GUT pour l'instant, peut-être la gravitation quantique - qui portent des caractères mixtes tels que : principe de symétrie, conditions extrapolées, faible base et incertitudes observationnelles, etc., dont il serait prématuré de dresser déjà l'inventaire.

\*

## Notes

1) Leon Lederman. *Nature*, 209, 28 octobre 1982. "Particle physicists look down with their microscopes and astrophysicists look up with their telescopes and find they are looking at some of the same things..."

2) M.Paty "La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique" *Fundamentae scientiae* 7, 1986, 47-87 ; "La relativité restreinte : la théorie et son objet" (en préparation).

3) A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?" *Physical Review* 47, 1935, 777-780.

4) Ce qui n'excluait cependant pas que les scientifiques aient eux-mêmes une pensée cosmologique. Je renvoie aux beaux travaux de Jacques Merleau-Ponty sur toute la période préparatoire à l'avènement de la cosmologie moderne (*La science de l'univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*. Vrin, Paris, 1983), aussi bien que sur la première période de cette dernière jusqu'à l'avènement du "modèle standard" (*Cosmologie du XXe siècle*, Gallimard, Paris 1965).

5) Voir pour une description historique, E. Hubble, *The realm of the Nebulae*, Yale University Press, 1936; re-ed. Dover 1958. Dans la formule, H est la constante de Hubble.

6) Albert Einstein, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie", *Sitzungsberichte der Königlich preussischen Akademie der Wissenschaften*, VI, 1917, 142-152. Trad. anglaise, "Cosmological considerations on the general theory of relativity", in A. Einstein, H.A. Lorentz, H. Weyl, H. Minkowski, *The principle of relativity*, re-ed, Dover, New-York, 1952. W. de Sitter, "On the relativity of inertia", *Proceedings of the Koninklijke Akademie van Wetenschappen*, 19, 1917, 1217-1225.

7) En 1917, le principe cosmologique concerne la distribution des étoiles. Plus tard il sera réajusté quant aux objets célestes et aux échelles de distance : il concerne de nos jours la distribution des galaxies.

8) A. Friedman, "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, 10, 1922, 377 ; Georges Lemaître, "Un univers de masse constante et de rayon croissant", *Annales de la société scientifique de Bruxelles*, 47A, 1927, 49-59. Voir aussi G. Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif*, Culture et civilisation, Bruxelles, 1972.

9) Einstein abandonne vers cette époque son modèle cosmologique et la constante cosmologique.

10) Albert Einstein. W de Sitter, "On the relation between the expansion and the mean density of the universe", *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 18, 1932, 213 - 124. La densité dans ce modèle est :  $\rho = \rho_c \approx (3 H^2) / (8 \pi G)$

11) Si  $\rho \leq \rho_c$ , expansion indéfinie; si  $\rho > \rho_c$ , recontraction.

12)  $H^{-1}$  est le temps requis pour que la distance entre les galaxies aît doublé.

13) P.J.E. Peebles, *Physical Cosmology*, Princeton University Press, Princeton, 1971.

14) Ibid., p. VII.

15) J.A. Wheeler, "The Black hole", in *Astrophysics and gravitation, Proceedings of the sixteenth Solvay Conference on physics at the University of Brussels*, Ed. de l'Université de Bruxelles, 1974, p.279-316 (p.279-280).

16) Parmi ces conditions aux limites, il faut inclure celle que l'univers constitue une totalité; le deuxième principe de la thermodynamique, par exemple, pose à un tel système des problèmes particuliers d'application.

17) Voir par exemple J.D. Barrow and F. Tipler, *The Anthropic principle* ; J. Démaret et C. Barbier, "Le principe anthropique en cosmologie", *Revue des questions scientifiques* 152,

1981, 181-222; 461-509; M. Paty, "Critique du principe anthropique", *La Pensée*, n°251, mai-juin 1986, 77-95.

18) Le théorème du viriel permet d'estimer la masse gravitationnelle des galaxies et de la comparer à la masse visible.

19) La masse physique est engendrée ensuite par une brisure de symétrie, selon le mécanisme de Higgs.

20) Parité ou inversion de l'espace.

21) Une bibliographie un peu complète est ici impossible. Indiquons cependant les conférences Nobel de S. Weinberg, A. Salam, S.L. Glashow, publiées dans *Review of modern physics* 52, 1980, 515 - 543.

22) La relation  $Q = T_3 + Y/2$ , où  $T_3$  représente l' "isospin faible" et  $Y$  l'hypercharge de fermions (sous le groupe  $U(1)$  ), implique des relations sur les charges :  $Q_u - Q_d = 1$ ,  $Q_\nu - Q_e = 1$ , etc., mais rien n'est dit par le modèle standard sur la quantification de la charge électrique, c'est-à-dire sur la valeur absolue de cette dernière.

23) Alors que la valeur de  $\sin^2\theta_{W-S}$  était estimée à 0,40 en 1974, sa mesure plus précise donnait, en 1978, 0,24. La valeur prédite par les GUT est de 0,25.

24) La valeur de l'asymétrie est exprimée par  $(N_b - N_{b^-})/N_\gamma = 10^{-9}$ .

25) Pour un exposé, voir par exemple V.A. Kuzmin, "Grand unified theory and cosmology", in *1985 CERN-JINR school of physics. Proceedings, CERN 86-03*, Genève, vol. 2., p. 356-393. Cf. aussi, par exemple, J. Ellis, "Supersymmetry and supergravity", *Proceedings of the 1985 International Symposium on lepton and photon interactions at high energies*, Kyoto, August 1985, p. 850-884. Les GUT comportent de nouvelles interactions et font intervenir de nouveaux paramètres; elles ne sont pas complètes (au sens général), mais se présentent comme plus complètes que le modèle standard. Les nouvelles interactions (superfaibles) violent les conservations de nombres baryoniques  $B$ , leptoniques  $L$ , de fermions  $F$ , ce qui entraîne des effets, les uns décelables à basse énergie (désintégration du proton, oscillations neutrons-antineutrons), les autres relatifs à l'univers primordial (asymétrie  $B-B^-$ , problème de l'horizon, isotropie et platitude de l'univers, inhomogénéités locales pour la formation des galaxies...).

26) J'emprunte ces deux informations à M. Dauvilliers, *Cosmologie et chimie*, Presses universitaires de France, Paris, 1955, p. 135. Par ailleurs, Paul Langevin est sans doute le premier à avoir exprimé, à l'aide de l'équivalence masse-énergie, les conditions énergétiques de la synthèse des éléments (P. Langevin, "L'inertie de l'énergie et ses conséquences", *Journal de physique*, 3, 1913, 553 et suiv., in P. Langevin, *Oeuvres scientifiques*, CNRS, Paris, 1950, p. 397-426 : p. 423).

27) Ils obtinrent  $5^{\circ}\text{K}$ , à comparer avec les  $2^{\circ}\text{K}$  observés par la suite.

28) Pour une description et des références, cf. P.J.E. Peebles, *Physical Cosmology*, op. cit., p. 121-158.

29) G. Lemaître, in *Nature*, 9 mai 1931. Cité dans G. Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif*, Culture et civilisation, Bruxelles, 1972, p. 25. Voir également, ibid., p. 147, et ibid., 2e partie, p. 6 et suivantes.

30) On pourrait appeler cette proposition "principe d'Eddington", comme je l'ai proposé ailleurs ("Critique du principe anthropique", op. cit.); il n'est pas sans rappeler le principe de Mach.

31) Eddington ressentait à cet égard une insatisfaction quant à la formulation de la mécanique quantique qui devrait, selon lui, pour être satisfaisante, faire référence non seulement à la fonction d'onde de l'électron (dans le cas du traitement de cette particule), mais à son étalon de mesure, c'est-à-dire la fonction d'onde de l'univers.

32) A. S. Eddington, *New pathways in science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1935, p. 230.

33) A. Einstein, "Autobiographisches. Autobiographical notes". in P.A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein philosopher-scientist*, The Library of living philosophers, Evanston (Ill), 1949, p. 58-59.

34) S. Weinberg, propos rapportés dans *Courrier CERN*, 25, n°2, mars 1985, 47 - 52.